

Das mechanische Verhalten von Vakuumisoliertgläsern unter Windbelastung

Isabell Schulz¹, Franz Paschke¹, Cenk Kocer², Jens Schneider¹

¹ TU Darmstadt, Institut für Statik und Konstruktion, Franziska-Braun-Straße 3, 64287 Darmstadt, Deutschland; schulz@ismd.tu-darmstadt.de; paschke@ismd.tu-darmstadt.de; schneider@ismd.tu-darmstadt.de

² University of Sydney, School of Physics, Sydney NSW Australia 2006; cenk.kocer@sydney.edu.au

Abstract

Das Interesse an Vakuumisoliertglas (VIG), einer thermisch optimierten und dünneren Alternative zu herkömmlichen Mehrscheibenisoliertgläsern, wächst. Während die jahrelange Optimierung der bauphysikalischen Eigenschaften bereits dazu führt, dass heute U_g -Werte von unter $0,4 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ erreicht werden können, fehlen für das mechanische Verhalten dieser Glaskomponenten hinreichende Bemessungsansätze, die den sicheren Einsatz von VIGs in Fenster- und Fassadensystemen gewährleisten. Insbesondere Windlasten werden in der Literatur in diesem Kontext nur selten behandelt. In Form einer FE-Analyse sollen Einflüsse verschiedener Design-Parameter auf das mechanische Verhalten von VIGs unter Windbelastung aufgezeigt werden. Anschließend werden diese in den Kontext der deutschen Glasbaunorm DIN 18008 und der Windlastnorm nach DIN EN 1991-1-4:2010 gestellt und bewertet.

Numerical investigation of the mechanical behavior of vacuum insulated glazing under wind load. Interest in vacuum insulated glazing (VIG), a thermally optimized and slim alternative to conventional multi-pane insulating glass units, is growing. While years of research into thermal performance have already resulted in U_g values of less than $0.4 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, there is a lack of sufficient design approaches for the mechanical behavior of these glass components to ensure the safe use of VIGs in window and facade systems. Especially wind loads are only rarely considered in this context. In the form of an FE analysis, influences of different design parameters on the mechanical behavior of VIGs under wind loading will be shown. The results will then be put into the context of the German standard for glass in buildings DIN 18008 and the wind load chapter of Eurocode 1.

Schlagwörter: *Vakuumisoliertglas, Windbeanspruchung, Parameterstudien, FEM*

Keywords: *vacuum insulated glazing, wind load, parametric studies, FEM*

Glasbau 2022. Herausgegeben von Bernhard Weller, Silke Tasche.

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivs License, which permits use and distribution in any medium, provided the original work is properly cited, the use is non-commercial and no modifications or adaptations are made.

Open Access funding enabled and organized by Projekt DEAL.

1 Einleitung

Die Technologie der Vakuumisolierverglasung (VIG) weckt zunehmend das Interesse von Architekten und Ingenieuren, die sich der Herausforderung stellen, den wachsenden Anforderungen an energieeffiziente Fenster- und Fassadensysteme gerecht zu werden. In Deutschland sind diese seit Ende 2020 im Gebäudeenergiegesetz verankert [4]. Um dessen Anforderungen (U_w -Werte von $0,9 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ für Wärmeschutzvariante A [4]) zu genügen, sind zukünftig U_g -Werte von $0,4 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$ oder geringer zu erreichen [17]. Da übliche 3-fach Isolierverglasungen in der Regel Werte von bestenfalls $0,6 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$ erreichen, kann der Richtwert nur durch Verwendung von 4-fach-Verglasung oder aber durch Verwendung von Vakuumisolierverglasung als Hybrid (eine Kombination aus einer VIG-Einheit und einem gasgefüllten Mehrscheibenisolierverglasung) erreicht werden. Letzteres kann bereits U_g -Werte von bis zu $0,3 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$ erreichen und ist aufgrund seines Aufbaus eine leichte und schlanke Alternative zur 4-fach-Verglasung [17]. Das Wirkungsprinzip der Vakuum-Isolierverglasungen ähnelt dabei dem einer Thermosflasche, da durch die Erzeugung eines Vakuums der Wärmetransport aus dem Gebäudeinneren an die Außenluft und der damit verbundene Energieverlust des Gebäudes minimiert wird. Der daraus resultierende Vorteil eines VIGs gegenüber anderen Mehrfachverglasungen ist die geringere Dicke des Aufbaus. Während bei einem VIG durch einen Scheibenzwischenraum (SZR) im Submillimeterbereich schon eine hochwärmedämmende Verglasungseinheit erzielbar ist, muss bei herkömmlichen Mehrscheibenisolierverglasungen (MIGs) der SZR im zweistelligen Millimeterbereich liegen, um ein vergleichbares Niveau an Wärmedämmwirkung zu erreichen. Dies macht VIGs nicht nur für Neubauten, sondern auch für die Sanierung bestehender Gebäudehüllen interessant, da die in der Vergangenheit – vor allem in Wohngebäuden – verwendeten 2-fach-Isolierverglasungen durch VIG-Hybride ersetzt werden können. Dadurch wird der thermische Widerstand in hohem Maße verbessert, ohne die Vorzüge einer schlanken und leichten Bauweise einzubüßen.

Um dem planenden Ingenieur zu ermöglichen, das vielversprechende energetische Hochleistungsglas in Fenster- und Fassadensysteme zu integrieren, bedarf es einem tiefgehenden Verständnis der auftretenden mechanischen Beanspruchungen, welche festgelegte Grenzen nicht überschreiten dürfen. Während das Verhalten der VIGs unter Einwirkung von atmosphärischem Druck (der aufgrund des erzeugten Vakuums dauerhaft auf die Gläser wirkt) sowie thermischer Belastung bereits ausgiebig in der Literatur beleuchtet wurde [z. B. 2, 6, 8, 9, 14, 16, 22] und sogar erste Normentwürfe von der ISO verabschiedet wurden [18], fehlt es derzeit noch an einer tiefgehenden Betrachtung des mechanischen Verhaltens des VIGs unter Windbelastung, die jedoch eine der grundlegenden Einwirkungen darstellt, der Fenster und Fassaden ausgesetzt sind.

Nach bestem Wissen der Autoren hat nur Liu et al. (2013) [19] das mechanische Verhalten von VIGs unter einer gleichmäßig aufgetragenen Flächenlast untersucht. Dazu wurden Experimente durchgeführt und die Ergebnisse mit einer analytischen Lösung für dünne Platten verglichen. Darüber hinaus liefert Chiu (2015) [5] experimentelle und numerische Ergebnisse für ein VIG unter Punktlast.

Beide Studien legen nahe, dass das VIG als gekoppeltes Glasscheibenpaar durch eine monolithische Scheibe mit äquivalenter Dicke ersetzt werden kann, die etwa

85–95 % der Gesamtdicke der einzelnen VIG-Gläser entspricht. Leider sind die Studien begrenzt und berücksichtigen nur einen kleinen Satz von Parametern; so betrachten Liu et al. zum Beispiel nur zwei Scheibengrößen (300 × 300 mm und 1000 × 1000 mm), eine mechanische Randbedingung und messen lediglich Dehnungen in der Mitte des Glases. Es sind außerdem nur die nominalen und nicht die tatsächlichen Dicken der verwendeten Testscheiben angegeben, was einen Vergleich mit Modell-daten erschwert.

Der vorliegende Artikel behandelt Grundlagen für eine systematische Untersuchung des mechanischen Verhaltens eines Vakuumisolierglases unter Windbelastung. Dazu werden zunächst allgemein der Aufbau, mögliche Ausführungsvarianten und mögliche mechanische Oberflächenspannungen des Glases in einem VIG beleuchtet. Außerdem wird auf die normativen Anforderungen eingegangen, welchen das VIG unter Windbelastung grundsätzlich bei Anwendung der derzeit in Deutschland geltenden Vorschriften genügen muss. Darauf aufbauend soll mithilfe der Finite-Elemente-Methode erörtert werden, welche Einflüsse die Scheibendimensionen, die Glasdicke, der aufgebrachte Winddruck und zwei verschiedene Randbedingungen auf die Verformungen und Spannungsverteilungen im VIG haben. Diese werden im Anschluss mit einer analytischen Lösung zur Abbildung dünner Platten verglichen und den Ergebnissen der Experimente von Liu et al. (2013) gegenübergestellt. Die Ergebnisse der Studie werden wiederum auf die Bemessung der VIG-Konstruktion im Hinblick auf die nach DIN EN 1991-1-4 typischen bemessungsrelevanten Einwirkungen aus Wind auf Fenster- und Fassadenkomponenten zurückgeführt und sollen einen Vergleich für handelsübliche VIG-Konfigurationen mit den in DIN 18008 angegebenen Grenzwerten der Spannungen und Verformungen für Glas ermöglichen. Unsere Studie beschränkt sich auf vertikale Fenster- und Fassadeninstallationen von Gebäuden mit geringer Höhe (Gebäude < 25 m), die den Großteil der Fensteranwendungen in Deutschland ausmachen [10].

2 Typischer Aufbau einer Vakuumisolierverglasung

Es sind heute viele Varianten von VIGs am Markt erhältlich, die an die gegebenen Randbedingungen und die daraus resultierenden Anforderungen eines Projektes gezielt angepasst werden können. Jedoch sind die Bestandteile eines VIGs im Grunde immer ähnlich. Ein VIG besteht aus zwei (oder mehr) Einzelgläsern, einem Randverbund und einem Stützenraster im SZR (engl. pillars). Zusätzlich ist bei den meisten VIGs ein Evakuierungsstutzen vorhanden. Durch diesen Evakuierungsstutzen wird das Vakuum während des Herstellprozesses erzeugt, wodurch im SZR eines VIGs ein Unterdruck von etwa 10^{-3} Torr ($\sim 0,13$ Pa) entsteht [8]. Die beiden Gläser werden in einem Abstand von 100 bis 300 μm separiert durch die Stützen aufeinandergesetzt und am Rand hermetisch miteinander verbunden. Dabei kann je nach Herstellprozess und Wahl des Randverbundes Float- bzw. thermisch vorgespanntes Glas eingesetzt werden. Der Randverbund wird flexibel als metallischer Randverbund [15] oder steif mithilfe eines Glaslotes ausgeführt [7]. In dieser Arbeit wird ausschließlich die VIG-Konstruktion mit einem steifen Randverbund betrachtet. Das Stützenraster wird benötigt, um dem auf die äußeren Glasoberflächen eines VIGs wirkenden atmosphärischen Druck standzuhalten [8]. Das Material muss dauerhaft hohen Druckbeanspruchungen widerstehen

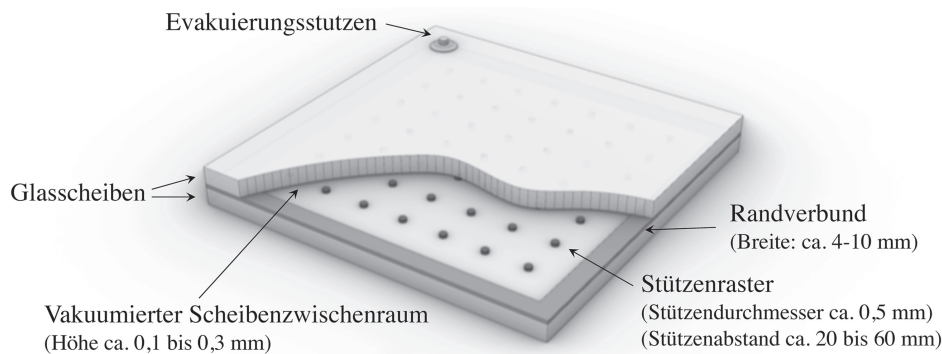


Bild 1 Schematischer Aufbau einer Vakuumisolierverglasungseinheit (© Schulz, ISM+D)

können. Dafür werden Stützen aus hochfestem Stahl oder Keramiken verwendet. Die gängigste Geometrie dieser Stützen ist zylinderförmig. Ein typischer Aufbau eines VIGs ist in Bild 1 schematisch zu sehen.

3 Mechanische Beanspruchung und relevante Einwirkungen auf VIGs

Ein VIG muss wie jede Fensterkonstruktion je nach Einsatzort Einwirkungen aus Eigengewicht, Temperaturdifferenzen, Stoßlasten und Wind widerstehen. In der Hybrid-Variante treten wie bei Standard-Isolierverglasungen zusätzlich Klimlasten aufgrund der Ausdehnung des gasgefüllten SZRs auf. Außerdem muss ein VIG im Vergleich zum Standard-Isolierglas dem ständigen Druck der Atmosphäre widerstehen. Er wirkt dauerhaft auf die äußeren Oberflächen eines VIGs. Die Druckdifferenz zwischen der Atmosphäre und dem SZR des VIGs führt zu einer Flächenlast von ca. 10 t/m^2 die auf beide Seiten des VIGs einwirkt. Infolgedessen werden die beiden Gläser auf das Stützenraster gedrückt und es entstehen Biegezugspannungen auf der äußeren Glasoberfläche über jeder Stütze, auf der inneren Glasoberfläche zwischen den Stützen und direkt im Kontaktbereich zwischen Glas und Stützen sowie senkrecht zum Rand gerichtete Biegezugspannungen im Bereich des Randverbundes. Die Größe dieser Spannungen ist von dem Abstand der Stützen zueinander abhängig. Für die Bemessung von VIGs sind diese Spannungen zu berücksichtigen. Dabei sind die Spannungsverteilungen direkt im Kontaktbereich zwischen Glas und Stützen auf der inneren, im Vakuum befindlichen Seite und den den Umwelteinflüssen ausgesetzten Außenoberflächen des VIGs getrennt voneinander zu betrachten.

Es ist bekannt, dass die Biegefestigkeit von Glas neben Mikrodefekten an den Oberflächen auch wesentlich vom Feuchtigkeitsgehalt der Umgebung abhängen kann [3, 20, 21]. Deshalb kann man davon ausgehen, dass die Versagenswahrscheinlichkeit an den äußeren Oberflächen im direkten Vergleich zur Glasbruchwahrscheinlichkeit im vakuumierten Scheibenzwischenraum sehr viel höher liegt. Dies erörtern Collins und Fisher-Cripps [8] in ihrem Paper zum Design des Stützenrasters in VIGs und

geben für typische Stützenradien Grenzen für die Stützenabstände an, unterhalb welcher das Versagen aufgrund einer Indentation der Stützen infolge des dauerhaft wirkenden atmosphärischen Drucks unwahrscheinlich ist. Für einen typischen Stützendurchmesser von 0,5 mm liegt die Grenze der Stützenabstände bei etwa 55 mm, wobei die dafür herangezogenen Versuchsergebnisse nicht unter inerten Bedingungen stattfanden und somit weit höhere Grenzen denkbar sind [16]. Dies berücksichtigend werden in dieser Arbeit bei der Erarbeitung eines Bemessungsansatzes für VIGs zunächst ausschließlich auf den äußeren Glasoberflächen auftretende Spannungen betrachtet. Für die Bemessung von VIGs unter dem Lastfall atmosphärischer Druck gibt es vereinfachte Ansätze, um die auftretenden Spannungen auf der der Umwelt ausgesetzten Außenoberfläche abzuschätzen. 1991 wurde an der Universität Sydney gezeigt, dass die analytische Lösung von *Timoshenko* und *Woinowsky-Krieger* für Biegezugspannungen einer einfach unterstützten dicken Platte mit einer lokalen im Zentrum befindlichen Last gut mit ihrer FE-Simulation übereinstimmt [8]. Dieser Vergleich wurde für verschiedene Nenndicken des Glases und Stützenabstände durchgeführt und ist in Bild 2 dargestellt.

Die resultierenden Biegezugspannungen infolge des atmosphärischen Drucks sind dauerhaft bei einem VIG vorhanden und müssen deshalb immer mit resultierenden Spannungen aus anderen Einwirkungen überlagert werden. Insbesondere Wind verursacht zusätzliche Biegezugspannungen auf den äußeren Glasoberflächen, welche mit denen aus atmosphärischem Druck kombiniert werden müssen.

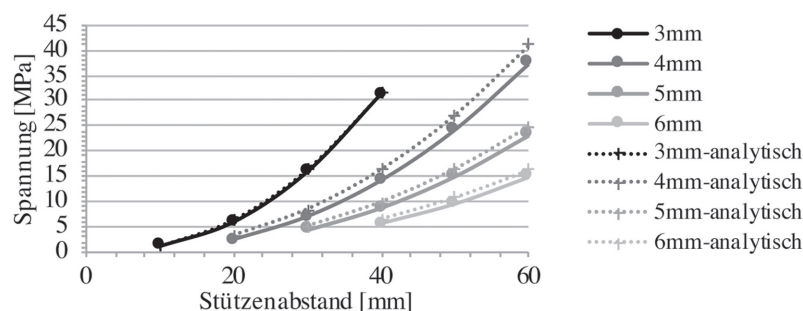


Bild 2 Vergleich der maximalen Hauptspannung auf der äußeren Glasoberfläche über den Stützen für typische Stützenabstände; numerisch berechnet (Stützen abgebildet als starre Vertikallagerung) und analytisch nach [8] angenähert (© Schulz, ISM+D)

4 Normative Anforderungen für VIGs unter Windbelastung

Bei der Planung von Fenster- und Fassadensystemen müssen Ingenieure sicherstellen, dass definierte Grenzwerte für mechanische Verformungen und Spannungen von der eingebauten Fenster- oder Verglasungseinheit selbst oder ihrer Tragkonstruktion nicht überschritten werden. Da es derzeit noch keine normativen Vorgaben für das Vakuumisolierverglasungsglas gibt, die eine Bemessung unter Windlasten ermöglichen, wird in diesem Artikel überprüft, in welcher Weise die in DIN 18008 und DIN EN 1991-1-4 gegebenen Widerstands- und Einwirkungsgrenzen von auf dem Markt verfügbaren VIGs eingehalten

ten werden können. Dieser Abschnitt liefert dafür eine Übersicht der Anforderungen auf der Einwirkungs- und Widerstandsseite.

4.1 Grenzwerte für Glasspannungen nach DIN 18008

Gemäß der deutschen Norm DIN 18008: *Glas im Bauwesen – Bemessungs- und Konstruktionsregeln – Teil 1* [12] erfolgt der Nachweis der ausreichenden Tragfähigkeit von Verglasungen auf der Grundlage des Nachweises der maximalen Hauptspannungen an der Glasoberfläche, wobei Eigenspannungszustände aus thermischer Vorspannung der Gläser auf der Widerstandsseite berücksichtigt werden (DIN 18008-1:2020 8.3.2).

Für den Nachweis einer Konstruktion ist generell nachzuweisen, dass die Bedingung $E_d \leq R_d$, mit E_d als Bemessungswert der Auswirkung und R_d als Bemessungswert des Tragwiderstands erfüllt ist (DIN 18008-1:2020 8.3.3). Folgende Gleichung ist dabei für die Ermittlung des Bemessungswertes des Tragwiderstandes gegen Spannungsversagen für vierseitig gelagerte Scheiben heranzuziehen (DIN 18008-1:2020 8.3.6/7):

$$R_d = \frac{k_{\text{mod}} \cdot k_c \cdot f_k}{\gamma_M} \quad (1)$$

wobei k_{mod} den Modifikationsbeiwert zur Berücksichtigung der Belastungsdauer darstellt und nur für nicht vorgespannte Gläser zu berücksichtigen ist. Für die Bemessung unter Windlast ist für k_{mod} 0,7 anzusetzen. Die Art der Konstruktion wird über k_c berücksichtigt und ist außer bei vierseitig gelagerten Floatglasscheiben (dann 1,8) mit 1,0 anzunehmen. Der charakteristische Wert der Biegezugfestigkeit wird durch f_k repräsentiert. Die üblich verwendeten Basisgläser von VIGs bestehen aus Floatglas oder thermisch vorgespanntem Glas, für welche eine Biegezugfestigkeit von 45 MPa bzw. 120 MPa anzusetzen ist. γ_M ist der Teilsicherheitsbeiwert für Materialeigenschaften und kann bei Floatglas im Allgemeinen mit 1,8 und bei vorgespanntem Glas mit 1,5 angenommen werden. Daraus ergeben sich die folgenden Grenzspannungen, welche beim Nachweis von vierseitig gelagerten Verglasungen für den Lastfall Wind nicht zu überschreiten sind: 31,5 MPa für Floatglas bzw. 80 MPa für vorgespanntes Glas. Es sei hier darauf hingewiesen, dass das VIG auch der dauerhaften Belastung aus atmosphärischem Druck alleine (bei Floatglas mit $k_{\text{mod}} = 0,25$) standhalten muss.

Auch die Durchbiegungen der Glasscheiben sind zu begrenzen. Gemäß DIN 18008-2:2020 [13] beträgt der Bemessungswert des Gebrauchstauglichkeitskriteriums im Allgemeinen 1/100 der Stützweite.

4.2 Einwirkungen aus Wind nach DIN EN 1991-1-4

Um die Leistung von VIG-Einheiten, die dem Wind ausgesetzt sind, aus der Sicht der Bauvorschriften und Normen zu bewerten, verwenden wir die Winddruck-/soggrenzwerte für Bauwerke bis 25 m Höhe. Die Grenzwerte der Einwirkungen aus Druckdifferenzen werden anhand der Daten und Verfahren berechnet, die in DIN EN 1991-1-4 [11] und dem deutschen nationalen Anhang beschrieben sind. Die ermittelten Werte sind in Bild 3 gegeben. Die angenommenen Randbedingungen und relevanten Faktoren sind ebenfalls angegeben. Für die Windlastzonen 1 bis 3, die in den meisten Regionen in Deutschland gelten, ergeben sich Bemessungswinddrücke zwischen 0,8 und 2 kN/m². Dieser Bereich wird deshalb in der numerischen Parameterstudie betrachtet.

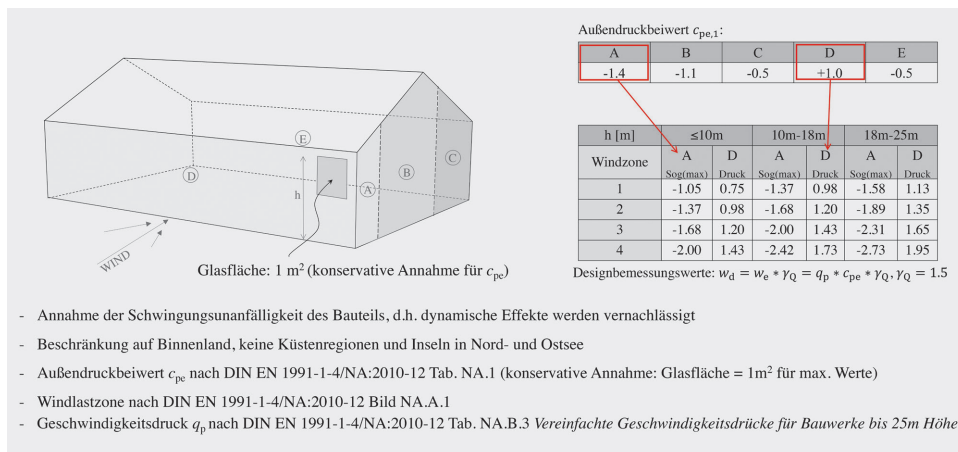


Bild 3 Design-Winddrücke nach DIN EN 1991-1-4:2010 für Gebäude bis 25 m Höhe
(© Schulz, ISM+D)

5 Numerische Simulation

In vorangegangenen Untersuchungen des thermomechanischen Verhaltens von Vakuumisoliergläsern konnte bereits gezeigt werden, dass die Finite-Elemente-Methode (FEM) Ergebnisse liefert, die eine gute Übereinstimmung mit direkten Messungen der Oberflächendehnung in Experimenten zeigen [2]. Deshalb wird auch hier die FEM zur Untersuchung der Spannungsverteilung von VIG-Einheiten unter Windbelastung herangezogen.

Es wurde die FEM-Software ANSYS 18.0 verwendet, um mechanische Simulationen durchzuführen. Die Elementtypen SOLID185/SOLID186 wurden zusammen mit den Elementen CONTA174 und TARGE170 verwendet, um die gesamte Geometrie, die Lastkonfigurationen, die Randbedingungen, geometrische Nichtlinearität sowie das Kontaktproblem abzubilden. Die Ansys Parametric Design Language (APDL) wurde eingesetzt, um eine vollständige 3D-Lösung mit effizienten parametrischen Modellen zu ermöglichen, die Daten über einen großen Parameterraum liefern. Für die Modellierung wurden die symmetrischen Eigenschaften der quadratischen VIG-Einheiten ausgenutzt, sodass nur ein Viertel der Platte simuliert wurde, um die Rechenzeit zu reduzieren. Eine Skizze des Viertelmodells ist in Bild 4a dargestellt. Die Abbildung zeigt auch die Lage der später angesprochenen Spannungs- und Verformungsprofile und -flächen in Bezug auf die Windlastorientierung.

Es wurde hier der traditionelle Aufbau des VIGs (vgl. Bild 1) modelliert, d.h. zwei Gläser, welche am Rand mit einem umlaufenden starren Randverbund aus Glaslot sowie zylindrischen Stützen aus einem hochfesten Metall gekoppelt sind, die den entsprechend hohen Druckspannungen aus atmosphärischem Druck standhalten können (Druckfestigkeit > 1 GPa, s. [8]). Die Kopplung der Glas-Metallfläche erfolgt über CONTA174 Elemente. Der hier angesetzte Reibungskoeffizient liegt bei 0,9 (Der gewählte Reibungskoeffizient wurde für den Grenzfall voller Verbund gewählt. Der absolute Grenzwert von 1,0 wurde dabei entsprechend abgemindert, da dieser zu nume-

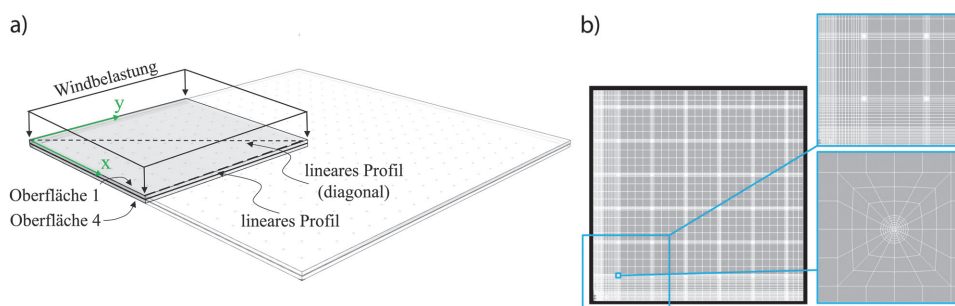
Tabelle 1 Eigenschaften der verwendeten Materialien in der FE-Simulation

	Dichte ρ [kg/m ³]	E-Modul E [MPa]	Querdehnzahl ν [-]
Glas/Glaslot	2500	70 000	0,21/0,22
Stützen	7850	210 000	0,3

rischen Problemen führte.). Die spezifischen Materialeigenschaften sind in Tabelle 1 angegeben. Der Stützenradius beträgt 0,5 mm, die Höhe der Stützen 0,2 mm. Die Netzfeinheit des Modells wurde so optimiert, dass die hier betrachteten Spannungen auf der Außenoberfläche des Glases konvergieren. Dies war insbesondere in Bereichen mit hohen Spannungsgradienten, d. h. im Bereich der Stützen und im Randbereich erforderlich. Eine typische Netzfeinheit von 0,01 bis 2 mm führte zur Konvergenz und Stabilität bei gleichzeitiger Minimierung des erforderlichen Rechenaufwands. Ein Beispiel des Netzes ist in Bild 4b zu sehen. Alle Lösungen wurden auf einem HPC-Cluster (High Performance Computing) mit 7636 Kernen (CPUs), 45 TB RAM, 378 TB Speicherplatz und einem 56-Gbit/s-FDR-InfiniBand-Netzwerk erzielt.

Werden ausschließlich die äußeren Oberflächenspannungen in der Betrachtung herangezogen, konnte festgestellt werden, dass die Eigenschaften der Stützen (Form und Größe) und die Breite des Randverbundes innerhalb der für die Praxis relevanten Designoptionen einen vernachlässigbaren Einfluss auf das Spannungsfeld haben. Die Parameter, die die Spannungen beeinflussen, sind im Wesentlichen die Glasdicke, die Größe der Glasplatte, der aufgebrauchte Flächendruck und die Randbedingungen an den Auflagern der VIG-Einheit. In allen Fällen waren die Gläser quadratisch, beide Einzelgläser gleich dick und gleich groß, wobei der Randverbund eine eigene Schicht zwischen den Scheiben darstellt. In den folgenden Abschnitten steht die Dickenangabe $d = 4$ mm für ein VIG, das aus zwei 4 mm dicken Einzelgläsern und einem 0,2 mm Vakuumpalt besteht. In den Simulationen wurden für die Lagerung des Glases zwei mechanische Randbedingungen (RB) betrachtet:

- RB 1 ‚gelenkig gelagert‘: Verschiebungen in z-Richtung $u_z(x = 0, y) = u_z(x, y = 0) = 0$
- RB 2 ‚fixiert‘: $u_z(x = 0 \dots 10 \text{ mm}, y) = u_z(x, y = 0 \dots 10 \text{ mm}) = 0$.

**Bild 4** Viertelmodell und Netzverfeinerung in Bereich der Stützen und am Rand
(© Schulz, ISM+D)

Bei anderen Belastungskonfigurationen, insbesondere bei punktueller Belastung [5] und bei thermischer Belastung [2], wird die VIG-Einheit bei vierseitiger Lagerung sphärisch gekrümmt. Gleiches ist für den Lastfall Wind zu erwarten.

6 Diskussion der Ergebnisse und Einordnung in den normativen Kontext

Im Folgenden werden die wichtigsten Erkenntnisse der Parameterstudie aufgezeigt und diskutiert. Obwohl sowohl der atmosphärische Druck als auch die Druckdifferenz aus Wind auf das numerische Modell einwirkten, zeigen die nachstehenden Diagramme, wenn nicht anders angegeben, nur die Verformungen und Spannungen aufgrund der Windlast, d.h. die Wirkung des atmosphärischen Drucks wurde unter der Annahme einer linearen Überlagerung von den Ergebnissen abgezogen.

In Bild 5 sind exemplarisch das numerisch und analytisch berechnete Verformungs- und Spannungsprofil einer 1×1 m großen, 4 mm dicken VIG-Einheit unter einer Druckbelastung von 1 kPa dargestellt. Für die analytische Vergleichslösung wurde eine Schubverformungsgleichung nach [1] herangezogen.

Das Verformungsprofil bestätigt die Annahme der sphärischen Krümmung der Gläser, die sowohl durch die numerische Simulation als auch die gewählte analytische Lösung abgebildet werden kann. Beim Vergleich der auftretenden Randspannung ist jedoch festzustellen, dass die analytische Gleichung für eine monolithische Platte nicht dazu geeignet ist, die Randspannungen im VIG abzubilden. Die analytische Gleichung wird deshalb ausschließlich für eine Annäherung der Verformungen und Spannungen in Scheibenmitte empfohlen. Aus diesem Grund werden in Bild 6 die Durchbiegung und Oberflächenspannung in der Mitte der VIG-Einheit für verschieden große VIGs gezeigt und die numerischen Ergebnisse mit der analytischen Lösung und den vorhandenen Daten aus Liu et al. verglichen. Zwei Beobachtungen sind besonders relevant:

1. Bei kleinen Dimensionen werden die numerisch ermittelten Spannungen und Verformungen durch die analytische Lösung bei Ansatz der Gesamtdicke des VIGs

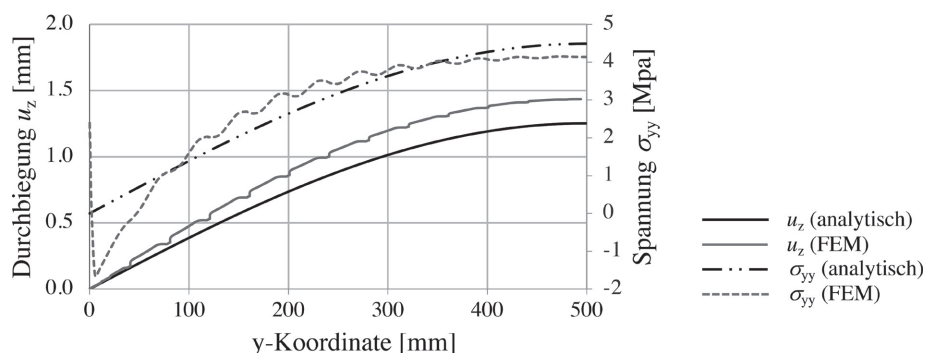


Bild 5 Profil der Durchbiegung u_z und der Spannung σ_{yy} (hier gleich der Hauptzugspannung) entlang der y -Achse in Scheibenmitte; Gegenüberstellung numerischer und analytisch errechneter Ergebnisse beispielhaft für eine quadratische Scheibe mit der Abmessung 1000×1000 mm, Scheibendicke $d = 4$ mm mit konstanter Flächenlast von 1 kPa (© Schulz, ISM+D)

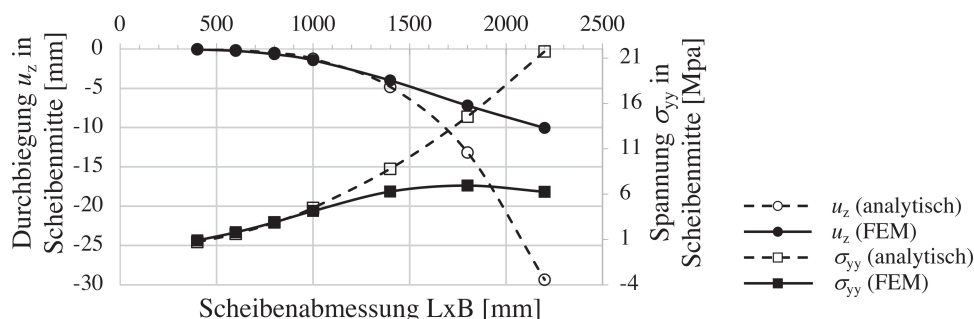


Bild 6 Verformung u_z und Spannungskomponente σ_{yy} in Scheibenmitte – numerische und analytisch errechnete Ergebnisse für eine konstante Flächenlast von 1 kPa, eine Scheibendicke d von 4 mm und verschiedenen Scheibenabmessungen (© Schulz, ISM+D)

unterschätzt. Dies lässt vermuten, dass das VIG, wie Liu in seinen experimentellen Untersuchungen auch zeigt, nicht näherungsweise als unendlich schubsteif angenommen werden kann und nicht durch eine der Gesamtglasdicke des VIGs entsprechenden einzelnen Glasscheibe (also 8 mm bei 2×4 mm VIG) bei der Druckbelastung senkrecht zur Oberfläche der Gläser ersetzt werden kann. Ein direkter Vergleich der Daten aus Liu et al. [19] und der geführten numerischen Simulation ist jedoch nicht möglich, da Liu ausschließlich nominale Dicken angegeben hat und so die wirklich vorhandene Scheibendicke für einen Vergleich unbekannt ist.

2. Mit wachsender Größe der Einheiten dominiert ein geometrisch nichtlineares Verhalten der Glasplatten bei Biegung, welches die Durchbiegung und die daraus resultierenden Oberflächenspannungen, die mit der FEM ermittelt wurden, begrenzt. Dies ist zu erwarten und wurde bereits beim thermomechanischen Belastungsverhalten beobachtet [2].

Bild 7 zeigt die kritischen Spannungsprofile der beiden äußeren Oberflächen. Es ist zu erkennen, dass die maximale Hauptzugspannung in Scheibenmitte auf der dem Druck abgewandten Oberfläche 4 auftritt, wohingegen die größten Randspannungen auf Oberfläche 1 auftreten. Die kritische Zugspannung entspricht dabei der Komponente σ_{yy} . Es sind außerdem die Spannungen für die beiden betrachteten Randbedingungen (RB) gegenübergestellt. Ein Vergleich zeigt, dass bei RB 2, welche eine Rotationseinschränkung am Rand widerspiegelt, geringere Spannungen in Scheibenmitte auftreten als bei RB 1. Gleiches konnte für die Verformungen festgestellt werden. Jedoch führt die Einschränkung der Rotation am Rand zu einer Erhöhung der auftretenden Randspannungen. Die kritische Komponente am Rand ist deshalb im betrachteten Fall σ_{yy} bei RB 2. Bei den in Bild 7 gezeigten Spannungsverläufen ist zu beachten, dass der punktuell sehr hohe Wert der Spannung, welcher aus dem Diagrammbereich hinausragt, auf eine unzureichende Netzanpassung im Übergangsbereich zwischen Glas und Randverbund (sehr feines Netz im Randbereich neben grobem Netz zwischen Randbereich und erster Stützenreihe) zurückgeführt werden kann, welche in dieser Studie jedoch ausreichend war, um die relevanten Spannungsverläufe auf der Oberfläche des Glases hinreichend genau abzubilden.

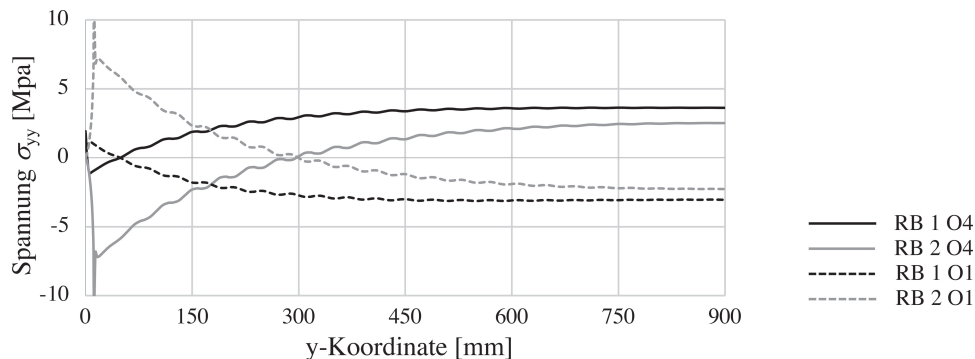


Bild 7 Spannungsprofile σ_{yy} einer 1800 mm großen quadratischen, 4 mm dicken VIG-Einheit unter 0,5 kPa konstantem Flächendruck für die Oberflächen 1 und 4 und Randbedingungen 1 und 2 (Ergebnisse für das Viertelmodell) © Schulz, ISM+D

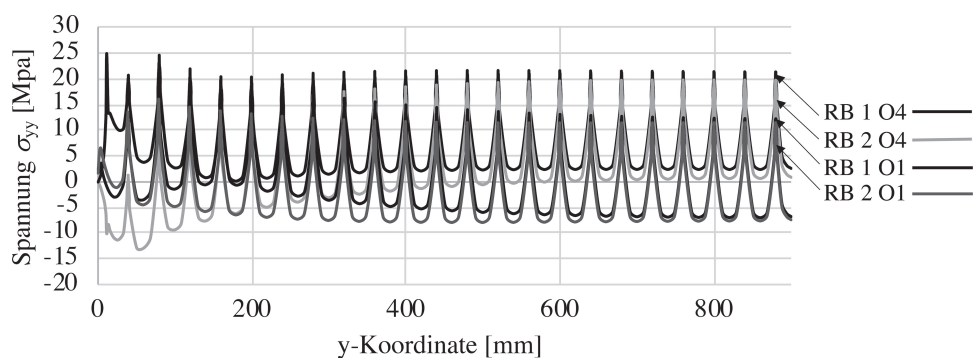


Bild 8 Spannungscomponente σ_{yy} entlang des linearen Profils in Scheibenmitte bei Überlagerung von Windlast und atmosphärischem Druck bei konstanter Dimension, Scheibendicke und Belastung für verschiedene Randbedingungen und betrachtete Oberflächen; Profil direkt über Stützenraster, wobei $L \times W = 1800 \text{ mm}$, $d = 4 \text{ mm}$ und $P = 0,8 \text{ kPa Wind} + 0,1 \text{ MPa Atm. Druck}$ © Schulz, ISM+D

Wie in Abschnitt 3 bereits erläutert, ist bei der Bemessung von VIGs in allen Fällen die Beanspruchung aus Wirkung des atmosphärischen Druckes zusätzlich zu berücksichtigen. In Bild 8 ist deshalb für die beiden äußeren Oberflächen und die beiden Randbedingungen die Spannungscomponente σ_{yy} für den überlagerten Lastfall atmosphärischer Druck und Wind beispielhaft für eine $1,8 \times 1,8 \text{ m}$ große VIG-Einheit dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die maximalen Zugspannungen nach Überlagerung der Einwirkungen weiterhin für RB 2 am Rand von Oberfläche 1 auftreten. Unter der Annahme, dass die reale Einbausituation des VIGs in einen Rahmen jedoch zwischen den beiden betrachteten Randbedingungen liegen wird, wird erkenntlich, dass die maximalen Zugspannungen über den Stützen nahe der Scheibenmitte angenommen werden können.

Dies berücksichtigend zeigt Bild 9 die maximalen Zugspannungen, welche sich unter einer Druckbeanspruchung für verschiedene Dimensionen, Lastfälle und Scheibendicken in Scheibenmitte ergeben. Es zeigt sich, dass erwartungsgemäß insbeson-

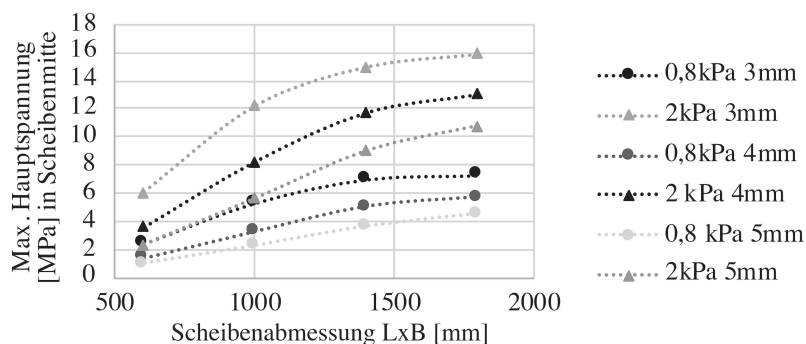


Bild 9 Maximale Hauptzugspannung in Scheibenmitte einer quadratischen VIG-Einheit für verschiedene Scheibendimensionen, Scheibendicken und aufgebrauchte Flächendrücke (© Schulz, ISM+D)

dere die Wahl der Scheibendicke einen wesentlichen Einfluss auf die maximalen Zugspannungen hat. Gleiches ist in Bild 2 für den Lastfall atmosphärischer Druck zu erkennen.

Um als Ingenieur nun zu überprüfen, welche Designoptionen von auf dem Markt verfügbaren VIGs einer auftretenden Einwirkung aus Wind standhalten, können für eine erste Abschätzung die in Bild 2 und 9 aufgeführten Spannungen addiert und mit den nach DIN 18008 maximal zulässigen Spannungen (s. Abschnitt 4) verglichen werden. Die in Bild 6 dargestellten maximalen Durchbiegungen in Scheibenmitte zeigen außerdem, dass es unproblematisch ist, die Grenzwerte der Verformungen nach DIN 18008-2 bei passend gewähltem VIG-Aufbau einzuhalten.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Mit numerisch durchgeführten Parameterstudien konnten Einflüsse verschiedener Design-Parameter auf das mechanische Verhalten von VIGs unter flächiger Druckbeanspruchung aus Wind aufgezeigt werden. Anschließend wurden diese in den Kontext der deutschen Glasbaunorm DIN 18008 gestellt. Folgende Schlüsse können aus der geführten FE-Studie abgeleitet werden und sind vom Ingenieur zu beachten:

Während das Biegeverhalten einer VIG-Einheit unter konstanter Flächenlast generell auf ein für Platten übliches Verhalten hindeutet, liegt es jedoch nicht auf der sicheren Seite für die Bemessung des VIGs für den Lastfall Wind die Gesamtsumme der Dicken der Einzelgläser anzusetzen. Es zeichnet sich eher ab, dass die äquivalent anzusetzende Dicke bei ca. 80–90% der Gesamtdicke liegt, wobei jedoch mit zunehmender Scheibengröße ein nichtlineares Verhalten dominiert, was wiederum die Spannungen und Verformungen nicht unbegrenzt anwachsen lässt. Diese Beobachtungen sind jedoch versuchstechnisch noch zu validieren. Es ist zu berücksichtigen, dass die maximalen Spannungen nicht immer in Scheibenmitte auftreten, sondern abhängig von der Randlagerung auch die Spannungen nahe des Glaslot-Randverbundes kritisch werden können. Dennoch zeigen die Parameterstudien, dass der Einsatz mäßig großer Scheiben von bis zu etwa 2 m Kantenlänge bei der richtigen Designwahl des VIGs (d. h. bei

passender Wahl der Scheibendicke, des Stützenrasters und des Randverbundes sowie unter Beachtung der Lagerbedingungen) grundsätzlich möglich ist und die in DIN 18008 angegebenen Spannungs- und Verformungsgrenzen eingehalten werden können.

Weitere Untersuchungen sind jedoch noch notwendig. Um die in der Studie angesetzten Annahmen in der realen Umsetzung zu gewährleisten, ist die Lagerungssituation des VIGs in einem komplex aufgebauten, typischen Rahmensystem aus der Praxis noch näher zu untersuchen. Außerdem sind Einflüsse der Schubbeanspruchung des Randverbunds und randnaher Stützen sowie kumulierende Einflüsse bei zyklischer Belastung, insbesondere auf die hier vernachlässigten Glasinnenflächen, noch zu untersuchen. Daraus sind anschließend qualitative Anforderungen an das verwendete Stützenmaterial abzuleiten, wodurch der Einsatz qualitativ hochwertiger, langlebiger VIGs sichergestellt wird. Schließlich sind weitere Variationen im numerischen Modell (z. B. die Variation des Reibungskoeffizienten) sowie ihr Vergleich mit Ergebnissen aus experimentellen Untersuchungen noch weiter zu betrachten.

8 Literatur

- [1] Adim, B; Daouadji, T.; Rabahi, A. (2016) A simple higher order shear deformation theory for mechanical behavior of laminated composite plates in: *International Journal of Advanced Structural Engineering (IJASE)* 8(2):103.
- [2] Aronen, A; Kocer, C. (2017) Vacuum insulated glazing under the influence of a thermal load in: *All Eyes On Glass, Glass Processing Days, Finland, Glass Processing Days*, Glaston, Finland, vol GPD 2017, pp. 273–279.
- [3] Budd, S. (1961) *The mechanisms of chemical reaction between silicate glass and attacking agents: Part 1. electrophilic and nucleophilic mechanisms of attack.* *Physics and chemistry of glasses* 2(4): pp. 111–114.
- [4] Bundesministerium für Justiz und Verbraucherschutz (2020) *Gesetz zur Einsparung von Energie und zur Nutzung erneuerbarer Energien zur Wärme- und Kälteerzeugung in Gebäuden.*
- [5] Chiu, A. (2015) *Mechanical behavior of vacuum insulated glazing.* Masterarbeit (unveröffentlicht), University of Sydney, School of Physics, Betreuer: Dr. Cenk Kocer.
- [6] Collins, R.; Davis, C.; Dey, C.; Robinson, S.; Tang, J. Z.; Turner, G. (1993) Measurement of local heat flow in flat evacuated glazing in: *International journal of heat and mass transfer* 36(10): pp. 2553–2563.
- [7] Collins, R. E.; Fischer-Cripps, A. C.; Tang, J. Z. (1992) *Transparent evacuated insulation*, *Solar Energy*, 49(5), pp. 333–350.
- [8] Collins, R. E.; Fischer-Cripps, A. C. (1991) Design of support pillar arrays in flat evacuated windows in: *Australian Journal of Physics*, 44(5), pp. 545–564.
- [9] Collins, R.; Asano, O.; Misonou, M.; Katoh, H.; Nagasaka, S. (1999) Vacuum glazing: Design options and performance capability in: *Glass in Buildings Conference*, Bath UK, vol 2.
- [10] Deutsche Energie-Agentur (2019) *Gebäudereport Kompakt: Statistiken und Analysen zur Energieeffizienz im Gebäudebestand.*
- [11] DIN EN 1991-1-4 (2010-12) *Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen – Windlasten*; Deutsche Fassung EN 1991-1-4:2005 + A1:2010 + AC:2010, Berlin: Beuth.

- [12] DIN 18008-1 (2020-05-00) *Glas im Bauwesen – Bemessungs- und Konstruktionsregeln – Teil 1: Begriffe und allgemeine Grundlagen*, Berlin: Beuth.
- [13] DIN 18008-2 (2010-05-00) *Glas im Bauwesen – Bemessungs- und Konstruktionsregeln – Teil 2: Linienförmig gelagerte Verglasungen*, Berlin: Beuth.
- [14] Fang, Y.; Eames, P.C.; Norton, B. (2007) *Effect of glass thickness on the thermal performance of evacuated glazing*, *Solar Energy*81(3): pp. 395–404.
- [15] Fang, Y.; Hyde, T.J.; Arya, F.; Hewitt, N.; Eames, P.C.; Norton, B.; Miller, S. (2014) *Indium alloy-sealed vacuum glazing development and context*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*37: pp. 480–501.
- [16] Fischer-Cripps, A.C.; Collins, R.E.; Turner, G.; Bezzel, E. (1995) Stresses and fracture probability in evacuated glazing in: *Building and environment* 30(1): pp. 41–59.
- [17] Glaser, S. et al. (2019) *Fenster- und Fassadensysteme mit Vakuumisierglas, Vorhabenbeschreibung BMWi Projekt*, Projektträger Jülich, Energieforschungsprogramm der Bundesregierung.
- [18] ISO 19916-1 (2018) *International Organisation for Standardization, Glass in building – Vacuum Insulating Glass Part 1: Basic Specification of Products and Evaluation Methods for Thermal and Sound Insulating Performance*.
- [19] Liu, X.G.; Bao, Y.W. (2013) Theoretical and experimental studies on strength and stiffness of vacuum glazing in: *Key Engineering Materials*, Trans Tech Publ, vol 544, pp. 265–270.
- [20] Michalske, T.A.; Freiman, S.W. (1982) *A molecular interpretation of stress corrosion in silica*. *Nature* 295(5849): pp. 511–512.
- [21] Michalske, T.A.; Freiman, S.W. (1983) *A molecular mechanism for stress corrosion in vitreous silica* in: *Journal of the American Ceramic Society* 66(4): pp. 284–288.
- [22] Turner, G.; Collins, R.; Fischer-Cripps, A.; Tang, J. (1994) Limits to performance of evacuated glazing in: *Optical Materials Technology for Energy Efficiency and Solar Energy Conversion XIII*, International Society for Optics and Photonics, vol 2255, pp. 648–659.